

Photonen mit der doppelten Energie der Grundmode. Diese zweite Harmonische kommt zwar nur mit etwa 0,1% Wahrscheinlichkeit vor, ist aber nicht vernachlässigbar. Zum anderen unterscheiden die Detektoren nicht zwischen einem einzelnen Photon hoher Energie und zwei fast gleichzeitig ankommenden Photonen, die in Summe die gleiche Energie besitzen, sog. koinzidente Ereignisse. Die Messungen mit dem zweiten Kristall bei niedrigen Intensitäten testeten den Anteil linearer Compton-Streuung an der zweiten Harmonischen des XFEL. Um die Zählung koinzidenter Ereignisse zu vermeiden, reduzierten die Forscher die Zahl hochenergetischer Photonen auf den Detektoren signifikant, indem sie davor Zirkonium-Filter platzierten. Dieses Material absorbiert Photonen oberhalb einer Energie von ungefähr 18 keV sehr stark, da diese Energie gerade ausreicht, um Elektronen aus der niedrigsten Schale zu ionisieren (sog. K-Kante).

Die Energieselektivität der Filter führte zu einem überraschenden Ergebnis. Bei einer XFEL-Photonenenergie von $\hbar\omega_0 = 9,75$ keV sollten die gestreuten Photonen des doppelten Compton-Effekts Energien von etwa $\hbar\omega_1 = 19,5$ keV besitzen. Die Rotverschiebung sollte etwa 700 eV betragen, sodass die Zirkonium-Filter zu einer deutlich verringerten Intensität führen sollten. Das Signal ist aber unerwartet stark, sodass von einer Rotverschiebung größer als 1,5 keV

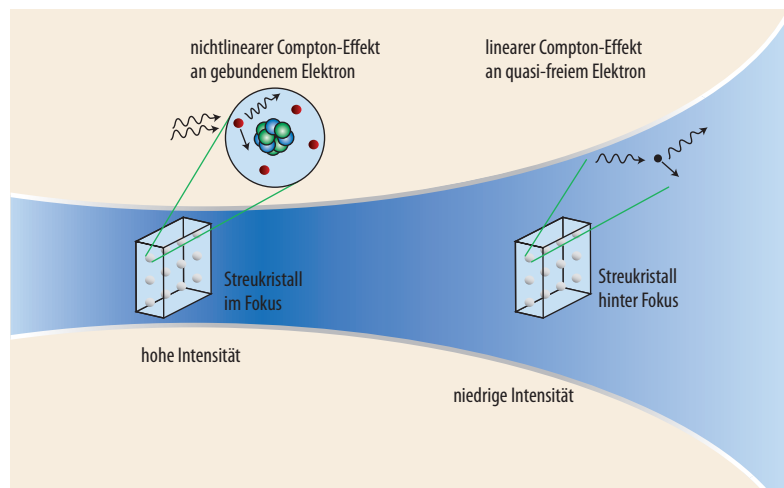


Abb. 1 Am ersten Streutarget im Fokus des Lasers ist die Intensität so hoch, dass der nichtlineare Compton-Effekt auftritt.

auszugehen ist, welche die Energie $\hbar\omega_1$ in den Bereich unterhalb der maximalen Absorption verschiebt.

Doch wohin verschwindet die fehlende Photonenenergie? Offensichtlich gibt es einen bisher unbekannt Mechanismus, der im nichtlinearen Bereich einen großen Energie- und Impulsübertrag auf die Elektronen oder die Atome selbst erlaubt. Vielleicht streuen die Photonen bevorzugt an Elektronen, die einen großen Impuls auf den Atomkern übertragen. Oder während der Streuung werden höhere Zustände der Elektronenschale angeregt. Außerdem ist denkbar, dass der Energieübertrag von atomaren Bindungseigenschaften abhängt. Dies eröffnet faszinierende neue Möglichkeiten, z. B. Kristallographie mit chemischer Strukturanalyse zu verbinden. Zuvor ist es nötig,

Die geringere Intensität am zweiten Streutarget erlaubt nur lineare Compton-Streuung an quasi-freien Elektronen.

den beobachteten Absorptionsmechanismus grundlegend zu verstehen. In jedem Fall erlaubt es der neu entdeckte nichtlineare Energietransfer, die Wechselwirkung intensiver Röntgenstrahlen mit Materie im Detail besser zu verstehen.

Felix Mackenroth

- [1] A. H. Compton, Phys. Rev. **21**, 483 (1923)
- [2] A. H. Compton, Phys. Rev. **22**, 409 (1923)
- [3] O. Klein und Y. Nishina, Z. Phys. **52**, 853 (1929)
- [4] S. Shwartz et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 163901 (2014)
- [5] T. E. Glover et al., Nature **488**, 603 (2012)
- [6] M. Fuchs et al. Nature Phys. **11**, 964 (2015)
- [7] L. S. Brown und T. W. B. Kibble, Phys. Rev. **133**, A705 (1964)
- [8] S. Herrmann et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **718**, 550 (2013)

■ Kuppeln mit Kolloiden

Auf mikroskopischer Skala ist es gelungen, eine Kupplung aus Kolloidteilchen aufzubauen.

Kuppelungen sind wesentlicher Bestandteil vieler Maschinen. Sie sind immer dann erforderlich, wenn die Übertragung von Kräften und Drehmomenten zwischen einem Motor und einem Getriebe kurzzeitig unterbrochen wird, wie es während eines Gangwechsels beim Autofahren der Fall ist. Der Trend zur Miniaturisierung hat neben der Elektronik längst

auch mechanische Komponenten erreicht: Neben Getrieben und Rotoren [1] ist mittlerweile der Bau kompletter Wärmekraftmaschinen [2] auf kleinsten Längenskalen möglich. Daher versuchen Wissenschaftler, das Prinzip der Kupplung in die Mikro- und Nanowelt zu übertragen. Auf diesen Skalen sind thermische Fluktuationen nicht mehr vernachlässigbar, was

uns herausfordert, die physikalischen Grundlagen solcher Maschinen neu zu verstehen. Häufige Anwendung finden Materialien aus dem Bereich der weichen Materie (DNA, Polymere, Kolloidteilchen), da sie sich mit Hilfe kleiner externer Felder oder durch Selbstorganisation zu hochkomplexen Funktionseinheiten organisieren lassen.

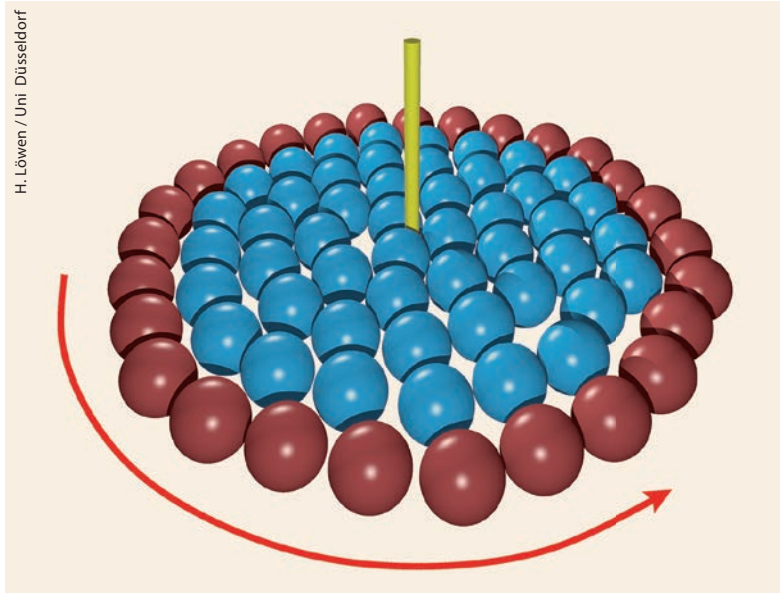


Abb. 1 Versetzt man die äußerste Lage der kolloidalen Teilchen (rot) durch einen Ring optischer Fallen in Rotation, so bilden sich im Innern konzentrische Ringe aus. Diese nehmen die Drehbewegung teilweise auf und leiten sie so zu

einer zentralen Achse weiter. Um das dabei erreichte Drehmoment zu kontrollieren, reicht es aus, z. B. die Dichte der Teilchen am äußeren Rand gezielt zu verändern.

Einem internationalen Forscherteam aus Santa Barbara, Princeton, Bristol, Mainz und Düsseldorf ist es nun gelungen, eine wenige Mikrometer kleine Kupplung aus weicher Materie herzustellen, die Drehmomente kontrolliert übertragen kann [3]. Diese Kupplung basiert anders als ihr makroskopisches Pendant auf einer scheibenförmigen Anordnung kolloidaler Teilchen, die in einer Flüssigkeit suspendiert sind (**Abb. 1**). Versetzt ein sich drehender Ring optischer Fallen die Teilchen am Rand in eine Rotationsbewegung, überträgt sich ein Teil dieser Drehbewegung auch auf die inneren Teilchen, die dann konzentrische Ringe ausbilden. Bemerkenswerterweise lässt sich durch diese Anordnung das übertragene Drehmoment äußerst präzise justieren. Eine gezielte Änderung der Kopplung zwischen den ringförmigen Strukturen kontrolliert nicht nur die Geschwindigkeit wie bei einer herkömmlichen starren Kupplung, sondern erlaubt es auch, die Art zu verändern, wie sich die Drehbewegung auf eine zentrale Achse überträgt.

Im Experiment haben die Forscher dazu den Radius des äußersten, angetriebenen Rings verändert und somit den mittleren Abstand

zwischen den Ringen etwas erhöht. Für starke Kopplungen ist ein festkörperartiges Verhalten zu beobachten, bei dem sich alle Ringe gleichförmig bewegen. Bei schwacher Kopplung tritt dagegen ein gewisser Schlupf auf. Die Teilchen führen eine „Stick-Slip-Bewegung“ aus, bei der die Dynamik benachbarter Ringe ständig zwischen einem Gleiten und Einrasten wechselt. Dabei pendelt die interne Anordnung der Teilchen auf einer charakteristischen Zeitskala von einigen Sekunden zwischen einem hexagonal geordneten und einem ungeordneten, flüssigkeitsartigen Zustand hin und her. Diese komplexe Art der Bewegung ist auch von Reibungsexperimenten bekannt. Computersimulationen, die explizit thermische Fluktuationen und hydrodynamische Effekte aufgrund der umgebenden Flüssigkeit berücksichtigen, belegen den Effekt.

In Analogie zu makroskopischen thermodynamischen Maschinen besitzt auch die Kolloidkupplung einen charakteristischen Wirkungsgrad, der durch das Verhältnis der geleisteten mechanischen Arbeit zu der von außen hineingesteckten Rotationsarbeit festgelegt ist. Eine zentral gelagerte

Achse, die fest mit dem innersten Ring der Teilchen verbunden ist (**Abb. 1**), könnte die geleistete mechanische Arbeit in künftigen Anwendungen aufnehmen und weiterverwerten, wie Simulationen gezeigt haben. Der Wirkungsgrad ist aufgrund der viskosen Reibung der umgebenden Flüssigkeit zwar sehr gering, hängt für die Kolloidkupplung aber nicht-monoton vom äußeren Drehmoment ab. Daher ist es möglich, den aktuellen Wirkungsgrad durch maßgeschneiderte Systemparameter um Größenordnungen zu verändern und kontrolliert zu optimieren.

Obwohl die Forscher ihre weiche Kupplung hier zunächst auf einer Mikrometerskala demonstriert haben, erwarten sie, dass sie das Funktionsprinzip auch auf deutlich kleinere Längenskalen übertragen können. Denn die obigen Überlegungen bleiben unverändert, solange die Partikel groß gegenüber der molekularen Struktur der umgebenden Flüssigkeit sind, weil diese dann als ein Kontinuum gilt.

Clemens Bechinger

- [1] P. Galajda und P. Ormos, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 249 (2001); Y. Klapper et al., *Small* **6**, 44 (2010)
- [2] V. Blickle und C. Bechinger, *Nat. Phys.* **8**, 143 (2012); T. Schmiedl und U. Seifert, *Europhys. Lett.* **81**, 20003 (2008)
- [3] I. Williams, E. C. Oğuz, T. Speck, P. Bartlett, H. Löwen und C. P. Royall, *Nat. Phys.* (2015), doi:10.1038/nphys3490